

OPTIMIZACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN USANDO GAMS

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
OPTIMIZACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LOS SISTEMAS DE
TRANSMISIÓN USANDO GAMS**

**AUTOR:
GONZALO ALEJANDRO YAGUANA GUTIERREZ**

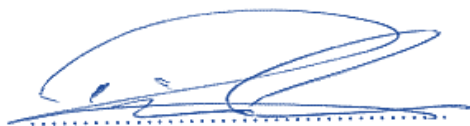
**DIRECTOR:
DIEGO FRANCISCO CARRION GALARZA**

Quito, Julio 2016

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, DIEGO FRANCISCO CARRION GALARZA, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación ***OPTIMIZACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN USANDO GAMS***, realizado por GONZALO ALEJANDRO YAGUANA GUTIERREZ, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Julio 2016



DIEGO FRANCISCO CARRION GALARZA

Cédula de identidad: 171370306-2

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, GONZALO ALEJANDRO YAGUANA GUTIERREZ, con documento de identificación N° 171766578-8, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “*OPTIMIZACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN USANDO GAMS*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELÉCTRICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



NOMBRE: GONZALO ALEJANDRO YAGUANA GUTIÉRREZ

Cédula: 171766578-8

Fecha: Julio 2016

INDICE GENERAL

Resumen.....	5
Abstract	5
Nomenclatura.....	6
1. Introducción.....	7
2. Expansión de Sistemas de Transmisión	7
3. Formulación del Problema	8
4. Aplicación De Los Modelos En La Planificación de Redes de Transmisión.....	11
5. Análisis de Resultados.....	133
6. Conclusiones.....	14
Referencias	155
7. Estado Del Arte	¡Error! Marcador no definido. 8

INDICE DE FIGURAS

Fig.1. Modelo GARVER 6 nodos.....	8
Fig.2. Sistema de Transmisión Ecuatoriano con Barras Candidatas.....	13
Fig.3. Trayectorias de Conexión Óptimas al PET.....	13
Fig.4. Gráficas de Optimización de Costos en los Escenarios del PET.....	13
Fig.5. Gráficas de Minimización de Pérdidas de Potencia Activa en los Escenarios del PET.....	14

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. NOMENCLATURA DESCRIPTIVA.....	6
TABLA 2. MATRIZ DE ESTADO DEL ARTE.....	17
TABLA 3. INDICADORES DE LA TEMÁTICA.....	18
TABLA 4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
TABLA 5. RESUMEN E INDICADORES DEL ESTADO DEL ARTE.....	20

OPTIMIZACIÓN DE LA EXPANSION DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISION USANDO GAMS

Resumen

La planificación de expansión de las líneas de transmisión (PET), se relaciona directamente con el progresivo incremento que sufre la demanda y generación eléctrica de un país, haciendo que necesariamente se busque la manera de crear nuevas redes de transmisión, para poder transportar la respectiva cantidad de energía eléctrica. Las redes de transmisión a expandir deben cumplir con requerimientos importantes como: calidad, confiabilidad y seguridad, pretendiendo de esta manera garantizar un manejo adecuado de los recursos eléctricos. Los datos contemplados en esta investigación son: capacidad de generadores existentes y futuros, número de líneas candidatas que expandirán el sistema de transmisión, demandas futuras dentro de un horizonte de planificación, restricciones operativas y de inversión, flujos de potencia presentes, etc. Mediante la utilización de software de optimización GAMS; (General Algebraic Modeling System) y MATLAB, se modelaron y resolvieron una serie de ecuaciones para poder determinar la optimización local más eficiente dentro de los escenarios utilizados; considerando costos de construcción y pérdidas de potencia activa, presentes en una expansión de líneas de transmisión a través del uso de Programación Lineal (PL) y la aplicación de las ecuaciones de flujos de potencia DC y modelo de Garver.

Abstract

Planning expansion of transmission lines (PET), it is directly related to the progressive increase experienced by the demand and power generation of a country, making necessarily find ways to create new transmission networks to transport the respective amount of electrical energy. Transmission networks to expand must meet important requirements such as quality, reliability and safety, intending thereby ensure proper management of electrical resources. The data referred to in this research are: existing and future capacity generators, number of candidate lines that will expand the transmission system, future demands within a planning horizon, investment and operating restrictions, present power flows, etc. Using optimization software GAMS; (General Algebraic Modeling System) and MATLAB, were modeled and solved a series of equations to determine the most efficient local optimization within the scenarios used; considering construction costs and losses of active power, present in an expansion of transmission lines through the use of Linear Programming (LP) and the application of the equations of DC power flow model and Garver.

Keywords: Expansion planning transmission networks (PET), Transmission Lines, GAMS, MATLAB, Garver, Power System, Smart Grid.

Palabras Clave: Planificación de Expansión de redes de transmisión (PET), Líneas de Transmisión, GAMS, MATLAB, Garver, Sistema Eléctrico de Potencia, Smart Grid.

Nomenclatura

z	Función Objetivo.	P_{loss}	Función Objetivo
K_{ij}	Costo a Invertir por línea adicional entre los nodos i-j	T	Período Total
CG_i	Costo de operación asociado a la generación de potencia en el nodo i.	rk	Resistencia de la línea k
PG_i	Generación de potencia activa en el nodo i.	C_g	Matriz de incidencia de los nodos de generación
E^+	Número total de líneas candidatos para la expansión.	p_g	Potencia activa del generador
N	Número total de líneas existentes en el sistema.	C_p	Matriz de incidencia de los nodos de potencia activa.
σ	Factor de ponderación que permite hacer comparables la inversión con los costos de generación.	C_g	Matriz de incidencia de los nodos de potencia reactiva
PDi	Carga en el nodo i.	q_g	Potencia reactiva del generador
M	Variable de holgura (factor M).	C_q	Matriz de incidencia de los nodos de potencia reactiva
f_{ij}	Flujo total de potencia activa entre los nodos i-j.	λp_d	Margen de capacidad de potencia activa de la carga.
E	Número total de líneas del sistema (Existentes + candidatas).	λq_d	Margen de capacidad de potencia reactiva de la carga.
n_{ij}	Número de líneas existentes entre los nodos i-j.	p_k	Potencia activa de la línea k
w_{ij}	Número de líneas nuevas entre los nodos i-j.	q_k	Potencia reactiva de la línea k
θ_i	Ángulo de fase del voltaje en el nodo i.	F_{LP}	Flujo de potencia activa
θ_j	Ángulo de fase del voltaje en el nodo j.	F_{LO}	Flujo de potencia reactiva
x_{ij}	Reactancia de línea entre los nodos i-j.	v_k	Magnitud de voltaje en la línea k
P_{ij}^{max}	Número de líneas existentes entre los nodos i-j	θ_k	Ángulo de fase en la línea k
PG_i^{min}	Inyección Mínima de Potencia activa en el nodo i	x_k	Valor discreto de la línea k
PG_i^{max}	Inyección Máxima de Potencia activa en el nodo i	p_k^{min}	Potencia activa mínima de la línea k
w_{ij}^{max}	Número máximo de líneas adicionales permitidas entre los nodos i-j.	x_k	Valor discreto de la línea k
PG_i^{min}	Inyección mínima de Potencia activa en el nodo i	p_k^{max}	Potencia activa máxima de la línea k
k	Líneas del Sistema	q_k^{min}	Potencia reactiva mínima de la línea k
i_k	Corriente de la línea k	x_k	Valor discreto de la línea k
t	Período individual	q_k^{max}	Potencia reactiva máxima de la línea k
v^{min}	Voltaje mínimo	θ^{min}	Ángulo de fase mínimo
v^{max}	Voltaje máximo	θ^{max}	Ángulo de fase máximo

TABLA 1.- NOMENCLATURA DESCRIPTIVA

1. Introducción

En la actualidad la demanda energética en las colectividades se ha ido incrementando de manera progresiva, conjugando de forma paralela estos resultados de crecimiento; con el consumo eléctrico de los usuarios, por tal motivo ha sido necesario expandir los sistemas eléctricos, para abastecer económicamente la demanda.

En el Ecuador actualmente los índices de demanda eléctrica se han incrementado y se espera un crecimiento anual del 4% hasta el año 2022[1], razón por la cual también ha sido necesaria la implementación de nuevas centrales de generación, capaces de producir la energía eléctrica requerida en el presente y también proyectándose para el abastecimiento de la demanda futura.

Desde el año de 1970, aparecen los estudios de planificación de la expansión de transmisión[2][3], los cuales establecen modelos de planificación basados en modelos de optimización, mismos que pueden caracterizarse por ser de tipo estático o dinámico.

La característica de una PET estática es minimizar el costo total del sistema, con el fin de cumplir con el crecimiento de la demanda y los patrones de generación, el mantenimiento de la fiabilidad del sistema, la estabilidad y las limitaciones económicas, teniendo presente el lugar y las condiciones adicionales para que las redes de transmisión puedan ser instaladas y satisfacer los requisitos del sistema manteniendo las limitaciones económicas y técnicas rigiéndose básicamente en las restricciones operativas[4][5][6].

Mediante la utilización del Sistema General de Modelamiento Algébrico (GAMS), se buscará modelar las ecuaciones de optimización de costos de

construcción y minimización de pérdidas de potencia activa de una PET de tipo estático. En todo PET, se generan problemas de costos, los cuales se interpretan como rubros económicos de construcción, operación y mantenimiento; los mismos que se pretenden solucionar con modelos matemáticos que consideren la topología actual del sistema, la previsión de la generación y la demanda, ecuaciones del balance de potencia que finalmente se traducen en expresiones lineales y no lineales con variables reales y enteras. Dada la naturaleza del modelo DC utilizados para el PET de este trabajo, se consideran ciertas simplificaciones derivadas del modelo AC; como los son: las magnitudes de voltaje en por unidad deber aproximarse a 1 p.u., se ignora la resistencia de línea ya que en relación a la reactancia de línea esta es insignificante ($R_{ij} \ll X_{ij}$) y finalmente que la diferencia de los ángulos de fase es un valor muy pequeño semejante a $\cos(\theta_i - \theta_j) \approx 1$, de esta forma obtenemos un modelo DC con las características propias de las redes de transmisión, por tal razón se considera como un problema de programación lineal (LP); que puede ser aplicado a los sistemas de prueba de la IEEE, así como al modelo de GARVER[7][8].

Uno de los factores importantes que se complementa en la PET, son las distancias y trayectorias candidatas a utilizar, en este caso la distancia euclídea óptima será la más cercana que se pudiera detectar de todas las posibles distancias de L/T candidatas[9].

2. Expansión de Sistemas de Transmisión

Dado que el incremento de la demanda de potencia, se ha convertido en un referente de creación de nuevos proyectos de conformidad a la

expansión de generación e incremento de demanda, debe ser reforzado para mejorar las características de suministro de energía eléctrica a los sistemas de distribución, bajo criterios de calidad, seguridad y confiabilidad, los cuales deberán estar establecidos en las normas de cada país[10].

En Ecuador los proyectos de generación eléctrica se han ido incrementando al paso de los últimos años hasta la actualidad, con el fin de satisfacer las demandas actuales y requeridas en los años siguientes[11][12].

Bajo este potencial crecimiento se hace indispensable la construcción de nuevas redes de transmisión, como un plan de expansión estático; que en este caso lo realizaremos considerando un conjunto de condiciones técnicas y económicas para lograr una entrega de generación máxima tomando en cuenta ciertos niveles de calidad y seguridad del suministro aplicados al sistema local[13] para obtener un PET óptimo, vinculando los proyectos de generación existentes y con los principales centros de consumo, considerando los niveles de voltajes de transmisión 138 [kV], 230 [kV] y 500 [kV].

3. Formulación del Problema

Los principales problemas que se presentan en los PET, se reducen a la búsqueda de una minimización de costos relacionados a la inversión y también a la forma de reducir las pérdidas que se presentan en la operación del sistema eléctrico de potencia[14][15], haciendo que las posibles expansiones se limiten a cumplir condiciones específicas en un horizonte de planificación definido[16]. Este precepto se justifica en la ecuación (1) y en su igualdad que cumple la siguiente condición:

$$(+)\text{ Generación} = (-)\text{ Costo Operación} \quad (1)$$

Otro problema importante que se presenta en los PET, son las variaciones de carga continua presentes en las redes del sistema eléctrico, por tanto estas variaciones múltiples deben ser detectadas en condiciones de funcionamiento y capturados en la formulación del problema. Según las curvas de duración de carga se puede observar la naturaleza variable de las cargas, por lo que se puede determinar que las redes poseen diferentes grados de variación de carga que puede ser tabulada en una base diaria, mensual y anual[17][18]. Por lo tanto, con el fin de determinar el conjunto de líneas conmutables que minimicen las pérdidas de potencia activa para las variaciones de carga en la red, se decidió utilizar diferentes modelos de programación matemática para la resolución del problema PET. En este trabajo investigativo se destacan en primera instancia: la aplicación de ecuaciones de flujos óptimos de potencia DC, para resolver el problema del PET mediante una Programación Lineal, el cual será validado posteriormente mediante el modelo de Garver similar al mostrado en la Fig. 1, analizado desde un sistema de seis barras, en donde la barra número seis será en donde se visualizarán las posibles expansiones y las barras existentes serán los puntos de referencia que contendrán los datos de los nodos involucrados en el cálculo de la expansión de las redes de transmisión; (Barras uno-cinco)[19].

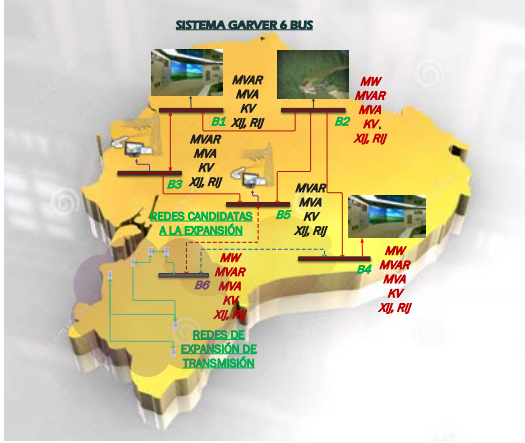


Fig.1. Modelo GARVER 6 nodos

En la segunda modelación, se usará la formulación del problema de transmisión, desde el punto de vista de un flujo de potencia[20], la ecuación planteada será una modelación no lineal debido a la no linealidad de las ecuaciones de flujo de potencia de corriente alterna, de esta forma se minimizarán directamente las pérdidas de potencia activa del sistema.

3.1. Modelo de Flujos Óptimos de Potencia DC

La función objetivo a utilizar ha tomado en cuenta los costos que intervienen en la expansión de transmisión y muestran aspectos económicos del sistema eléctrico de potencia, es por tal motivo que las ecuaciones matemáticas aquí presentes están enfocadas a la minimización de costos de inversión para la expansión de transmisión, realizando un arreglo adecuado de las variables de control. Las ecuaciones de flujos de potencia AC, s el análisis de flujos de potencia, en donde se contempla la distribución ordenada de potencia activa y reactiva, voltajes en los nodos y ángulos de voltajes del sistema; sin embargo este método puede llegar a ser muy complejo cuando esta aplicado a sistemas eléctricos de gran media debido a la cantidad de variables y ecuaciones que se introducen, es por esta razón que se utilizan de manera

más factible las ecuaciones de flujo de potencia DC, logrando así una simplificación de ecuaciones de flujo de potencia, agilidad de convergencia y sencillo análisis.

La PET considerada en esta investigación es del tipo estático, sobre la cual se puede aplicar (1) que corresponde a la minimización de los costos asociados a la expansión de los sistemas de transmisión.

$$\text{f.o.} \quad \min Z = \sum_{(i,j) \in E^+} K_{ij} W_{ij} + \sigma \sum_{i=1}^N CG_i PG_i \quad (1)$$

$$\text{s.a.} \quad PD_i = PG_i - \sum_{j \in E} f_{ij} \quad (2)$$

$$f_{ij} = \frac{(n_{ij} + w_{ij})}{x_{ij}} (\theta_i + \theta_j) \quad (3)$$

$$-(n_{ij} + w_{ij}) P_{ij}^{max} \leq f_{ij} \leq (n_{ij} + w_{ij}) P_{ij}^{max} \quad (4)$$

$$PG_i^{min} \leq PG_i \leq PG_i^{max} \quad (5)$$

$$0 \leq w_{ij} \leq w_{ij}^{max} \quad (6)$$

$$-\theta_i^{max} \leq \theta_i \leq \theta_i^{max} \quad (7)$$

Dentro de las restricciones del modelo de flujos óptimos de potencia DC, se debe considerar el balance de potencia (2) que involucra la conservación de energía en los nodos, de esta forma se comprende que el flujo de potencia va desde el nodo i hacia j , los flujos de potencia DC entre nodos $i-j$ (3), la restricción de desigualdad que garantizará que el flujo de potencia entre los nodos $i-j$, estén siempre dentro de los límites permitidos de funcionamiento (4), los límites de la producción de energía por parte de los generadores (5), el número máximo de las posibles líneas a instalarse (6). Según las características del modelo de flujos de potencia DC, es necesario considerar el ángulo de fase del voltaje para el análisis de expansión de líneas de transmisión y deben estar limitados

de forma que se muestra en la restricción (7).

3.2. Minimización Pérdidas de Potencia Activa

Generalmente, el problema de transporte de energía en las redes de transmisión son reconocidas como funciones de optimización no lineal[21], las cargas de potencia varían de forma continua en las redes del sistema eléctrico, estas variaciones son instantáneas y necesariamente deben ser capturadas en la formulación del problema, para ello es necesario contemplar las ecuaciones del flujo de potencia, por esta razón las ecuaciones serán aplicadas directamente al flujo de potencia de corriente alterna, ya que, de esta manera se pueden evaluar y determinar el conjunto de líneas conmutables que pueden minimizar las pérdidas de potencia activa para la naturaleza variable de las cargas y que pueden tornarse en aplicaciones a utilizar en las redes inteligentes.

La representación generalizada para el envío de transmisión teniendo en cuenta múltiples niveles de variación en la curva de duración de carga, serán formuladas en las ecuaciones (8)-(12), detalladas a continuación:

$$\text{f.o.} \quad \min P_{loss} = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{k=1}^{NL} |i_k(t)|^2 r_k \right) \quad (8)$$

$$\text{s.a} \quad C_g p_g(t) - C p(t) = \lambda p_a(t) \quad (9)$$

$$C_g q_g(t) - C q(t) = \lambda q_a(t) \quad (10)$$

$$p_k = F_{LP}(v_k(t), \theta_k(t)) \quad (11)$$

$$q_k = F_{LQ}(v_k(t), \theta_k(t)) \quad (12)$$

$$\text{Luego:} \\ x_k = \begin{cases} 1, & \text{si la línea } k \text{ está en servicio} \\ 0, & \text{esta fuera de servicio} \end{cases} \quad (13)$$

$$p_k^{min} x_k \leq p_k(t) \leq p_k^{max} x_k \quad (14)$$

$$-M(1 - x_k) + p_k(t) \leq F_{LP} \leq p_k(t) + M(1 - x_k) \quad (15)$$

$$q_k^{min} x_k \leq q_k(t) \leq q_k^{max} x_k \quad (16)$$

$$-M(1 - x_k) + q_k(t) \leq F_{LQ} \leq q_k(t) + M(1 - x_k) \quad (17)$$

$$v^{min} \leq v(t) \leq v^{max} \quad (18)$$

$$\theta^{min} \leq \theta(t) \leq \theta^{max} \quad (19)$$

La ecuación (8), representa las pérdidas de potencia activa de una red que se pretende minimizar. Las ecuaciones (9) y (10), representan el balance de potencia activa y reactiva presentes en el flujo de potencia.

Las ecuaciones (11) y (12), respectivamente representan la potencia activa y reactiva que fluye a través de una línea k en un período de tiempo t , ya que las matrices de incidencia utilizan de forma intrínseca variables de voltaje y ángulos de fase[22].

Para el efecto y aplicación de las ecuaciones de minimización de pérdidas de potencia activa, se tomaron en cuenta las restricciones transferencia de potencia activa (14)-(15), transferencia de potencia Reactiva (16)-(17), restricciones de voltaje (18) y ángulo de fase (19).

Estas restricciones indican las siguientes características:

- Una línea se mantiene en servicio si $x=1$, en la ecuación (14)-(16), los términos del principio y el final de la ecuación tienden a cero (0), por esta razón la potencia activa y reactiva del sistema se mantiene en el valor máximo y mínimo especificado de la línea.
- La línea se mantiene fuera de servicio si $x=0$, en este caso se selecciona un valor que delimite entre un valor positivo y negativo de gran valor para las potencias activa y reactiva, este valor será designado como una variable de holgura o factor M , por lo tanto estos valores no representaran a los niveles críticos (17).

En las restricciones (18) y (19) se reflejaran los parámetros de

funcionamiento en donde se limitarán los niveles máximos y mínimos de los voltajes y ángulos de fase permisibles en el proceso de la minimización de potencia activa en las líneas de transmisión.

4. Aplicación De Los Modelos En La Planificación de Redes de Transmisión

En la primera parte de análisis se usará el modelo de flujos óptimos de potencia DC, el cuál presenta características de programación lineal entera mixta[23]. A fin de validar los resultados del modelo, se aplicará el mismo en el sistema “Garver” de seis nodos.

El sistema antes citado también es conocido como un modelo de transportes, por tanto, únicamente se consideran sistematizaciones sencillas como en la primera de ley de Kirchhoff y las capacidades de transmisión de las líneas[24].

Una ventaja importante de la metodología a usar para resolver el SEP propuesto por “Garver”, es la exigencia solamente de soluciones sucesivas de programación lineal.

Para el efecto de aplicación de este modelo se utilizó la ayuda del Sistema General de Modelamiento Algébrico (GAMS)[25], con el propósito de lograr una minimización de costos confiable, ya que este software se caracteriza por realizar iteraciones secuenciales, es decir uno después de otro, utilizando tiempos de iteración propios de solver de GAMS[26], basado en el sistema Garver la secuencia que realizó el programa es el siguiente:

1. Formulación de ecuaciones de un flujo de potencia como un problema lineal.
2. Resolución del problema de distribución del sistema de potencia usando programación lineal.

3. Selecciona el circuito que se agregará al sistema, en función de donde se ubique el nivel de más alto sobrecarga, obtenido de la ejecución del flujo de potencia.
4. Repite la ejecución del flujo de potencia y va seleccionando los posibles circuitos a agregar hasta que los niveles de sobrecarga sobre las líneas del sistema desaparezca.

Una vez descrito de forma general el modelo a utilizar para lograr la minimización de los costos buscados por la función objetivo y el sistema de prueba en el cual se aplicó, se describe el algoritmo que se utilizó a continuación:

Algoritmo del Método de Garver de 6 nodos	
Paso 1.	Conocer el escenario de despacho: Esto implica hallar la potencia de generación disponible (PG_i^{min} , PG_i^{max}) y demanda estimada en cada nodo (PD_i).
Paso 2.	Determinar los costos de operación de las generadoras existentes, dentro del escenario de estudio (CG_i).
Paso 3.	Establecer los datos de la red existente, estos datos corresponden a: <ul style="list-style-type: none"> • Topología de la red • Reactancia de cada línea (x_{ij}) • Límite de capacidad de cada línea (P_{ij}^{max})
Paso 4.	Determinar los datos de las redes candidatas, estos datos corresponden a: <ul style="list-style-type: none"> • Topología de la red • Reactancia de cada línea candidata (x_{ij}) • Límite de capacidad de cada línea candidata (P_{ij}^{max}) Costo de inversión de cada línea candidata (K_{ij}).
Paso 5.	Establecer el número máximo de líneas que el sistema permite agregar a la red de transmisión (w_{ij}^{max}), a este dato lo conocemos en el programa como el factor de

capacidad para instalar nuevas líneas.

Paso 6. Fin del proceso iterativo

Para la minimización de las pérdidas de potencia activa que comprende el segundo modelo de optimización en el plan de expansión de líneas de transmisión, se debe conocer que el despacho económico es una de las herramientas de gestión en los sistemas eléctricos de potencia; se utiliza para asignar una cantidad determinada de generación de energía, a las unidades de generación con el fin de satisfacer las demandas de las cargas activas[27]. Una de las principales dificultades del Despacho económico es que este es un problema de optimización no lineal, limitada a gran escala, es por eso que en la solución dicho limitante; el programa de optimización planteada en el software MATLAB, realiza una linealización clásica como un método de solución robusta a los problemas de despacho de transmisión, utilizando las ecuaciones correspondientes al modelo de flujos de potencia AC, en donde se contemplan todos los valores de potencia activa y reactiva de las ecuaciones del balance de flujo de potencia presente en el modelo de Garver mencionado en la primera modelación, de esta manera se superan las limitaciones de la no linealización del modelo clásico[28]. Adicionalmente y con el propósito de contrastar la efectividad del modelo, en este trabajo se utilizó un algoritmo de solución denominado iteración λ (lambda), el cual se basa en la utilización de los conceptos de medición de distancias Euclidianas[29], para poder obtener las distancias más cortas y eficientes para las nuevas redes; el algoritmo utilizado para la solución de estas funciones es el siguiente:

Algoritmo del Método de solución iteración Lambda y Distancias Euclidianas

Paso 1: Se define λ_L y λ_H ; tal que

Paso 2: $\sum_{i=1}^{Ng} P_{Gi}(\lambda^L) - P_D < 0$ y $\sum_{i=1}^{Ng} P_{Gi}(\lambda^H) - P_D < 0$

Paso 3: Mientras: $(\lambda^H - \lambda^L) > \xi$

Paso 4: Hacer: $\lambda^M = (\lambda^L + \lambda^H)/2$

Paso 5: Condicionamos:

$$\text{If: } \sum_{i=1}^{Ng} P_{Gi}(\lambda^M) - P_D > 0$$

$$\lambda^H = \lambda^M$$

Paso 6: Caso contrario:

$$\lambda^L = \lambda^M$$

Paso 7: Fin del proceso iterativo

A continuación describiremos el proceso de ingreso de los datos complementarios para realizar el proceso de restricciones de potencia activa.

Flujo de Corriente Continua Para el Ingreso de Potencias

Paso 1: Ingreso Potencia "Pot", Cargas de Potencia "D", "Error" Del Método de lambda ($errorlambda = 100$).

Paso 2: Calcular "B" matriz de admitancias; Eliminación fila y columna barra Slack "B1"

$$B1_{ij} = \frac{V_i - V_j}{\hat{z}_{ij}} = \hat{y}_{ij} V_i - V_j$$

Paso 3: - Calculo de la matriz de cofactores "cof(B1)"

- Calculo de la inversa de "cof(B1)⁻¹"

- Calculo del determinante "det(B1)"

Paso 4: Calculo de la matriz "X", la cual la determinamos a partir de: $X = \frac{\text{cof}(B1)}{\text{det}(B1)}$

Paso 5: Incremento de una fila y una columna en "X"

$$\Delta f1 \text{ and } \Delta c1; "X"$$

Paso 6: Cálculo de A (m, i)

$$A(m, i) = \frac{X * (o(m), i) - X * (f(m), i)}{Xr(m)}$$

Paso 7: Calculo de flujos "Fl"

$$Dm = P - D$$

$$Fl = A * Dm$$

Paso 8: Calculo de las perdidas en las líneas

$$P_{ant} = P(1)$$

$$P(1) = Dot + Lt - P(i)$$

Paso 9: Incorporación de las pérdidas en los nodos

$$Da(i) = \frac{Da(i) + L(j)}{2}$$

$$Do(i) = \frac{Do(i) + L(j)}{2}$$

$$D(i) = Da(i) + Do(i)$$

Paso 10: Cálculo de la nueva potencia Slack P (2).

$$P(2) = Dot + Lt - P(1)$$

Paso11: Cálculo de las restricciones de error:

$$error = P(1) - P(2); error = 0$$

$$error = error; \text{fin del proceso error}$$

$$error > 0; \text{ir Paso 7: } \begin{cases} Dm = P - D \\ Fl = A * Dm \end{cases}$$

$$error < 0; \text{ir Cálculo Fp}$$

$$\therefore Lm(m) = 2 * R(m) * Flpu(m)$$

Paso 12: Fin del proceso iterativo

5. Análisis de Resultados

En la Fig.2. se aprecia, la presencia de las nuevas barras que conformarán la futura expansión de las redes de transmisión, junto con las redes existentes del sistema, así mismo se muestra los nuevos proyectos de generación que se ubican en el mapa como muestra inicial de la expansión, antes de proceder con la minimización de distancias y costos.

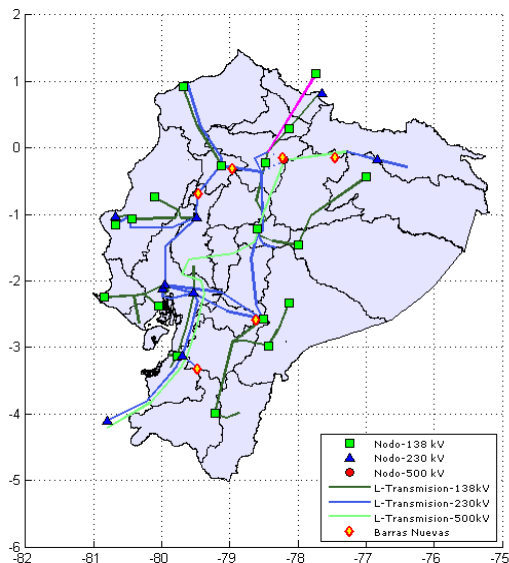


Fig.2. Sistema de Transmisión Ecuatoriano con Barras Candidatas

De la misma forma el sistema de transmisión está conformado de líneas de transmisión con capacidades de transmisión distintas, pero en el caso de las barras candidatas a expandir, no se puede determinar a qué nivel de carga se puede conectar, para ello se utilizó la función de distancias euclidianas para calcular las distancias entre las líneas nuevas y los puntos de conexión de las mismas, encontrando de esta manera la trayectoria más cercana a conectar y al mismo tiempo se pudo optimizar los costos de construcción, resultado que los visualizamos en la Fig.3.

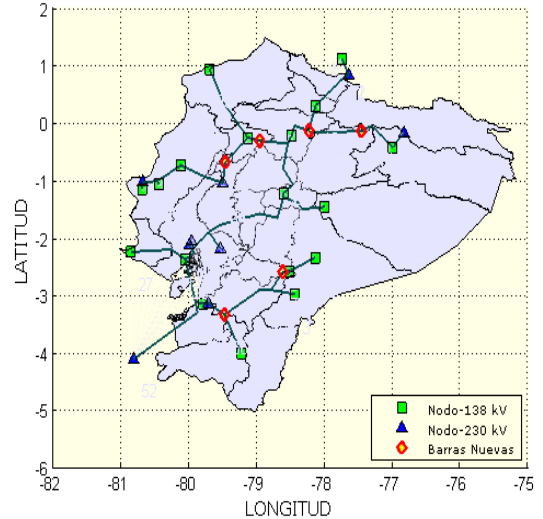


Fig.3. Trayectorias de Conexión Óptimas al PET

Para aclarar y resaltar los resultados del modelo de flujos óptimos de potencia DC planteado en este trabajo, en la Fig.4. se visualiza la gráfica de los costos posibles, de acuerdo con los proyectos de expansión, por lo que se pudo modelar dos alternativas de conexión y luego de correr los flujos de potencia en el modelo de GAMS, se determinó la opción óptima para nuestro PET, planteado.

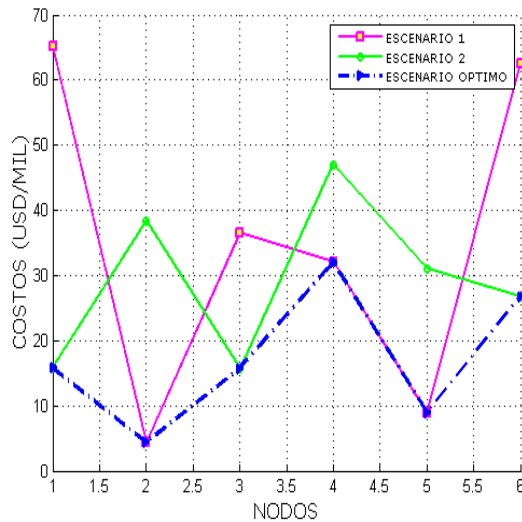


Fig.4. Gráficas de Optimización de Costos en los Escenarios del PET.

Como se aprecia en el primer escenario (línea magenta), existen variaciones muy considerables en lo que se refiere a costos, en el segundo escenario (línea verde) ya se puede apreciar una mejoría y una gráfica de costos más regular, y en la gráfica del tercer escenario (línea azul), pues los costos se optimizan de una forma muy eficiente y podemos deducir que se logró el objetivo de la optimización mediante nuestras funciones planteadas.

En el modelo de la optimización de pérdidas, se consideraron los mismos escenarios de expansión, con la particularidad que se tomaron en cuenta los valores de Potencia Activa y Reactiva de los flujos de potencia del plan de expansión de líneas de transmisión, los cuales contemplan los datos del flujo de potencia, dichos resultados los reflejaremos en la Fig.5.

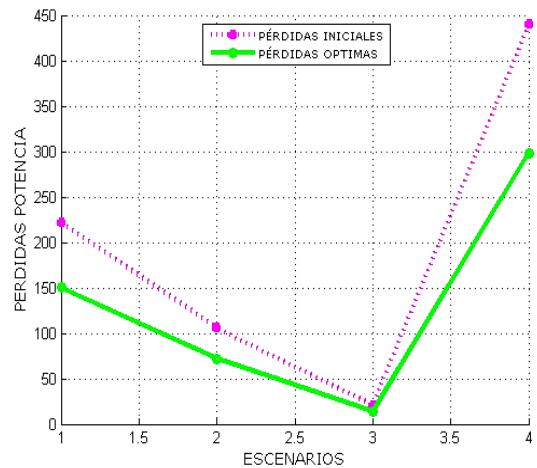


Fig.5. Gráficas de Minimización de Pérdidas de Potencia Activa en los Escenarios del PET

Para esta simulación de optimización se realizaron dos corridas del flujo con los parámetros de trayectorias descritas anteriormente, de esta manera podemos apreciar que la línea (Pérdidas Iniciales ---), nos muestra valores de pérdidas en el sistema de expansión considerable, por lo que también repercute en los costos (Fig. 4.), pero en la línea (Pérdidas Optimas ---), luego de aplicar el modelo de optimización en el software, se reducen las pérdidas, por lo tanto la función objetivo de optimización de pérdidas en el PET, se ha cumplido exitosamente.

6. Conclusiones

El modelo de flujos óptimos de potencia DC, correspondiente a la optimización de costos (Fig.4.), en el escenario de expansión uno se ha generado un costo de optimización correspondiente al 50%, en el escenario de expansión dos, un costo de optimización aproximado de 57,1%, finalmente en el escenario de expansión tres, se obtuvo una optimización correspondiente al 74,5%; de esta forma se concluye que el escenario tres ofrece la mejor alternativa por lo que se considera el escenario óptimo.

En la minimización de pérdidas de potencia activa (Fig.5.), se aprecian dos corridas de flujo de potencia, de aquí

que en la gráfica número uno llamada pérdidas iniciales, se realizó la corrida del flujo de potencia correspondiente a los escenarios de expansión sin el método de minimización y se obtuvo un valor de pérdidas del 64,3%, en cambio en la gráfica número dos se obtuvo un porcentaje de pérdidas de 42,9% luego de haber aplicado el método de minimización de pérdidas planteado en este trabajo, por tanto se concluye que mediante la utilización de este método el porcentaje de minimización logrado es igual al 21,4%.

Este trabajo ha cumplido con las condiciones de optimización que se puede tener en un PET, por lo que se puede aplicar a cualquier sistema de expansión estático, pero en el caso de expansiones de tipo dinámico, se debe proyectar los modelos para otros escenarios, teniendo en cuenta el tiempo y características de la expansión, además de los modelos a utilizar, en los que implique programación no lineal o de datos variantes.

Referencias

- [1] E. Albornoz and MEER, "Plan Maestro De Electrificación 2012-2021," p. 448, 2012.
- [2] J. L. Rueda, J. Cepeda, I. Erlich, D. Echeverría, and G. Argüello, "Heuristic optimization based approach for identification of power system dynamic equivalents," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, no. 0, pp. 185–193, 2015.
- [3] I. L. L. Garver, "Transmission network estimation using linear programming," *IEEE Trans. Power Appar. Syst. PAS*, vol. 9, no. 7, pp. 1688–1697, 1970.
- [4] C. Rathore and R. Roy, "A novel modified GBMO algorithm based static transmission network expansion planning," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 519–531, Nov. 2014.
- [5] Y.-K. Lin and C.-T. Yeh, "Maximal network reliability with optimal transmission line assignment for stochastic electric power networks via genetic algorithms," *Appl. Soft Comput.*, vol. 11, no. 2, pp. 2714–2724, 2011.
- [6] V. H. Hinojosa, N. Galleguillos, and B. Nuques, "A simulated rebounding algorithm applied to the multi-stage security-constrained transmission expansion planning in power systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 47, pp. 168–180, 2013.
- [7] Z. Moravej, M. Jazaeri, and M. Gholamzadeh, "Optimal coordination of distance and over-current relays in series compensated systems based on MAPSO," *Energy Convers. Manag.*, vol. 56, pp. 140–151, Apr. 2012.
- [8] B. Keyvani, M. Karbalaye Zadeh, and H. Lesani, "Stability enhancement of multi-machine systems using adaptive reclosing of transmission lines," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 391–397, Nov. 2014.
- [9] D. Prasad, "Fault Detection and Phase Selection using Euclidean," *Adv. Electr. Eng. (ICAEE), 2014 Int. Conf.*, 2014.
- [10] B. Alizadeh and S. Jadid, "A dynamic model for coordination of generation and transmission expansion planning in power systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 65, pp. 408–418, 2015.
- [11] A. B. Babić, A. T. Sarić, and A. Ranković, "Transmission expansion planning based on Locational Marginal Prices and

- ellipsoidal approximation of uncertainties,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, pp. 175–183, 2013.
- [12] C. A. Correa Florez, R. A. Bolaños Ocampo, and A. H. Escobar Zuluaga, “Multi-objective transmission expansion planning considering multiple generation scenarios,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 398–409, Nov. 2014.
- [13] H. Shayeghi and a. Bagheri, “Dynamic sub-transmission system expansion planning incorporating distributed generation using hybrid DCGA and LP technique,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 48, no. 1, pp. 111–122, 2013.
- [14] F. Ugranlı and E. Karatepe, “Multi-objective transmission expansion planning considering minimization of curtailed wind energy,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 65, pp. 348–356, 2015.
- [15] A. Aguila, D. Carrión, and L. Ortiz, “Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015.
- [16] E. B. Fisher, R. P. O’Neill, and M. C. Ferris, “Optimal transmission switching,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1346–1355, 2008.
- [17] G. Vinasco, D. Tejada, E. F. Da Silva, and M. J. Rider, “Transmission network expansion planning for the Colombian electrical system: Connecting the Ituango hydroelectric power plant,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 110, pp. 94–103, 2014.
- [18] N. Alguacil, A. L. Motto, and A. J. Conejo, “Transmission expansion planning: A mixed-integer LP approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 1070–1077, 2003.
- [19] T. H. Sikiru, A. A. Jimoh, Y. Hamam, Y. Alayli, and J. T. Agee, “Transmission dispatch for loss minimisation using linearised power flow equations in mixed integer programming,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 855–861, Nov. 2014.
- [20] B. Vyas, R. P. Maheshwari, and B. Das, “Protection of series compensated transmission line: Issues and state of art,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 107, pp. 93–108, Feb. 2014.
- [21] A. Rastgou and J. Moshtagh, “Improved harmony search algorithm for transmission expansion planning with adequacy–security considerations in the deregulated power system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 60, pp. 153–164, Sep. 2014.
- [22] T. Akbari and M. Tavakoli Bina, “A linearized formulation of AC multi-year transmission expansion planning: A mixed-integer linear programming approach,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 114, pp. 93–100, Sep. 2014.
- [23] F. Barati, A. Nateghi, H. Seifi, and M. S. Sepasian, “Generation and transmission expansion planning with considering natural gas network,” *2013 21st Iran. Conf. Electr. Eng.*, pp. 1–7, 2013.
- [24] F. D. Munoz, B. F. Hobbs, and S. Kasina, “Efficient proactive transmission planning to accommodate renewables,”

- IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, p. 6345237, 2012.
- [25] T. Casasus, M. Mocholi, V. Sanchis, and R. Sala, "Optimización Económica Con Gams," *V Jornadas Asepuma*, pp. 1–21.
- [26] M. C. Ferris, "MATLAB and GAMS : Interfacing Optimization and Visualization Software *," *Sci. York*, vol. 53706, pp. 1–20, 2005.
- [27] Q. Li, M. Liu, and H. Liu, "Piecewise normalized normal constraint method applied to minimization of voltage deviation and active power loss in an ac-dc hybrid power system," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 3, pp. 1243–1251, 2015.
- [28] S. Udgir, L. Srivastava, and M. Pandit, "Optimal placement and sizing of SVC for loss minimization and voltage security improvement using differential evolution algorithm," *Int. Conf. Recent Adv. Innov. Eng. ICRAIE 2014*, p. 6909310, 2014.
- [29] F. Voss, C. Gloaguen, F. Fleischer, and V. Schmidt, "Distributional properties of euclidean distances in wireless networks involving road systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 7, pp. 1047–1055, 2009.